Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 105 (1979)
Heft: 2

Artikel: Evaluation de stratégies énergétiques dans le contexte économique
Autor: Saugy, Bernard
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73812

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Evaluation de stratégies énergétiques dans le contexte économique [1]

par Bernard Saugy, Lausanne

Le développement de modèles techniques pour l'évaluation de stratégies énergétiques exige la prise en considération de la dimension économique des choix. En pratique, la fusion de modèles techniques et de modèles économiques se révèle difficile pour deux raisons principales ; tout d'abord, le niveau d'agrégation des données est très différent et d'autre part, l'échelle des temps n'est pas la même.

Du point de vue du technicien, la désagrégation des modèles économiques usuels n'est pas suffisante pour analyser les répercussions de ressources ou de technologies de remplacement, et ces modèles, basés sur la structure économique actuelle, sont adaptés à l'étude de pronostics à court terme mais ne peuvent couvrir le temps nécessaire au développement et à l'introduction, en proportion significative, d'une nouvelle technique. A l'opposé, du point de vue de l'économiste, l'analyse de la contribution des divers éléments du système énergétique et particulièrement l'étude des performances des techniques d'utilisation, est incompatible avec la structure des données statistiques économiques à disposition. L'objectif du projet commun en cours entre le projet ZENCAP [2] et le Projet SYSTEN [3] est de mettre en évidence un interface précis entre un modèle économique et un modèle technique de manière à bénéficier des contributions des deux types de modèles sans détruire les propriétés de base des approches respectives.

1. Scénarios et échelle des temps

De manière très sommaire, une approche technique permet d'identifier trois types de scénarios énergétiques, soit :

— *développement énergétique* basé sur les ressources nucléaires ;

— *stabilisation énergétique* basée sur un usage accru des ressources fossiles ;

— *austérité énergétique* centrée sur l'usage de ressources renouvelables.

Il est de plus en plus fréquemment admis que la projection des mécanismes actuels de consommation associés à la structure économique présente conduisent à une *demande d'énergie* qui ne pourra être satisfaite que par l'utilisation intensive de *toutes les ressources connues*, et en particulier des centrales nucléaires et des surgénérateurs [4]. Un tel développement a toutefois des conséquences sociales et politiques sérieuses. Dans le contexte actuel, on peut penser que ce développement ne sera possible sans contraintes indésirables que s'il est profondément justifié. En d'autres termes, l'analyse de nouvelles *structures de la demande énergétique* est impérative et conduit à envisager de manière aussi complète et objective que possible des scénarios de stabilisation ou d'austérité.

Les étapes nécessaires à l'introduction d'une nouvelle technique sont nombreuses et impliquent des délais ou une « inertie » qui doivent être pris en considération. Il s'agit successivement de :

— développer la technique jusqu'à ce qu'elle devienne commercialement acceptable,

— développer ou créer l'infrastructure industrielle permettant la production,

— produire et introduire ces équipements dans le marché en quantité suffisante pour représenter une contribution significative.

Il convient de relever que le temps nécessaire à l'implantation d'une nouvelle technique comparé à la durée de vie des équipements correspondants doit être suffisamment long pour assurer la continuité de la production et maintenir l'infrastructure industrielle en fonctionnement, entre la période de production de la première génération des équipements et la production des équipements remplaçant les appareils usagés (fig. 1). Cette condition relative à l'infrastructure de production implique que le temps minimum pour implanter une technique à la *moitié de son niveau de saturation* est de l'ordre de grandeur de la durée de vie de l'équipement correspondant. Compte tenu des délais de développement et des délais d'implantation, on ne peut espérer une contribution significative d'une nouvelle technique dans un délai inférieur à *deux fois la durée de vie des équipements*. Ainsi, l'inertie du marché pour une montre, un poste de radio à transistors ou un calculateur de poche peut être très faible ; par contre, dans le domaine énergétique, ou pour les habitations, les effets d'une nouvelle technique ne seront sensibles que dans un délai de vingt à cinquante ans. L'analyse des répercussions des choix énergétiques doit, par conséquent, s'étendre sur une ou deux générations.

2. Interface entre le modèle technique et le modèle économique

Le modèle économique développé dans le projet ZENCAP [3] (fig. 2) comprend une description des échanges entre secteurs industriels (matrice Input-Output), y compris les échanges entre secteurs énergétiques. Ces échanges décrivent donc les flux monétaires entre secteurs énergétiques (par exemple, achat de pétrole pour produire de l'électricité), les « achats » d'énergie par les secteurs industriels et les « achats » de biens industriels par les secteurs énergétiques. Le modèle économique est régi par une simulation macroéconomique, incluant les choix économiques et politiques relatifs aux investissements et aux échanges entre pays.

Les principales relations entre ce modèle économique et un modèle technique portent sur trois aspects principaux :

— La formation du capital par le modèle économique peut être comparée aux investissements requis pour une stratégie énergétique donnée.

— Les échanges entre secteurs énergétiques et la demande de biens par

[1] Communication de l'IPEN (Institut de production d'énergie) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
(Texte présenté lors de la « 5th Conference on global Modeling IIASA » Laxenburg [1] et lors du séminaire « On Energy Modeling », Lausanne 1978).

[2] Projet ZENCAP, Institut für Wirtschaftforschung (WIF), EPF — Zurich. R. Codoni et P. Staub en particulier.

[3] Projet SYSTEN, Institut de production d'énergie (IPEN), EPF — Lausanne, en collaboration avec le Projet d'Ecole « Energie et chauffage des bâtiments ». J.-M. Toinet, A. Roulier, Ph. Dind en particulier.

[4] La Conférence mondiale de l'Energie à Istambul 1977 prévoit pour l'Europe de l'Ouest [2] une consommation d'énergie primaire en 2020 égale 2,4 à 3,3 fois celle de 1972 et une proportion nucléaire de 33% (équilibre production et consommation entre blocs mondiaux). Ces proportions appliquées à la Suisse donneraient :

— consommation moyenne actuelle 24 GW en 1975 et 55 à 75 GW en 2020 dont 18 à 25 GW d'origine nucléaire en 2020. Par comparaison la production nucléaire moyenne (énergie primaire selon convention OCDE) en Suisse pour 1977 (Beznau I et II, Mühleberg) est de 0,88 GW (UCS 12/1978).

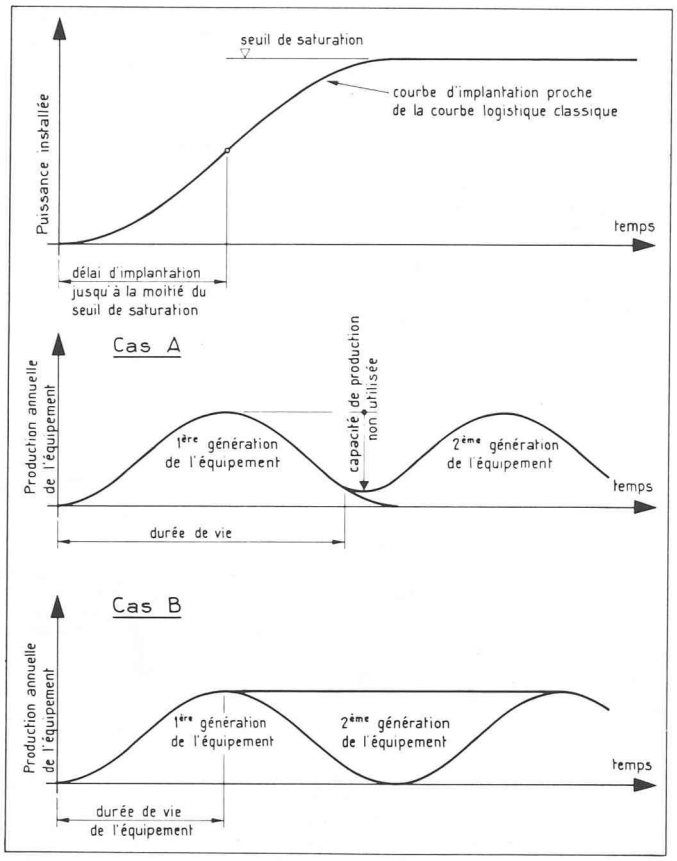

Fig. 1. — Relation théorique entre la production d'un nouvel équipement et la puissance installée.

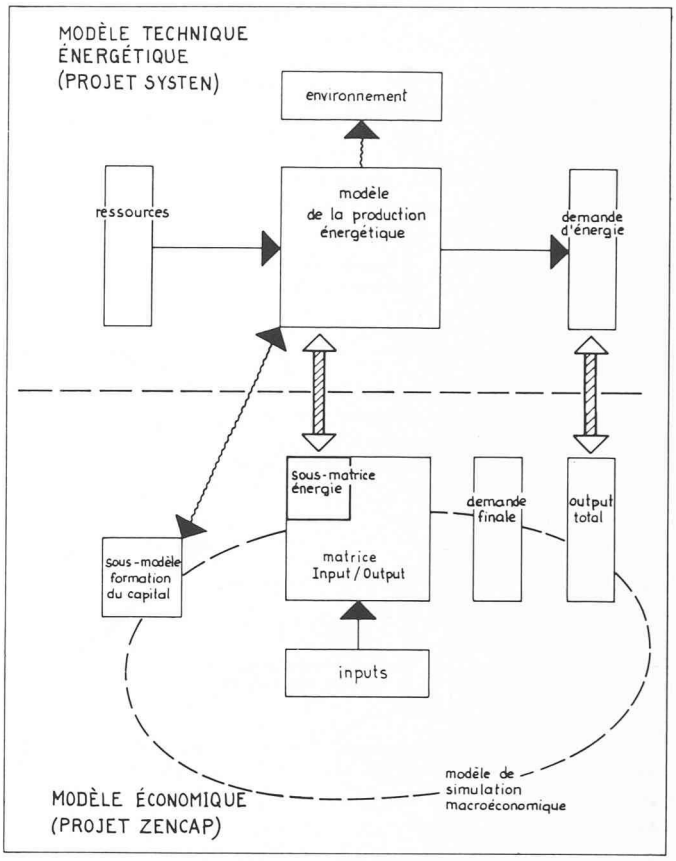

Fig. 2. — Interaction entre les modèles technique et économique.

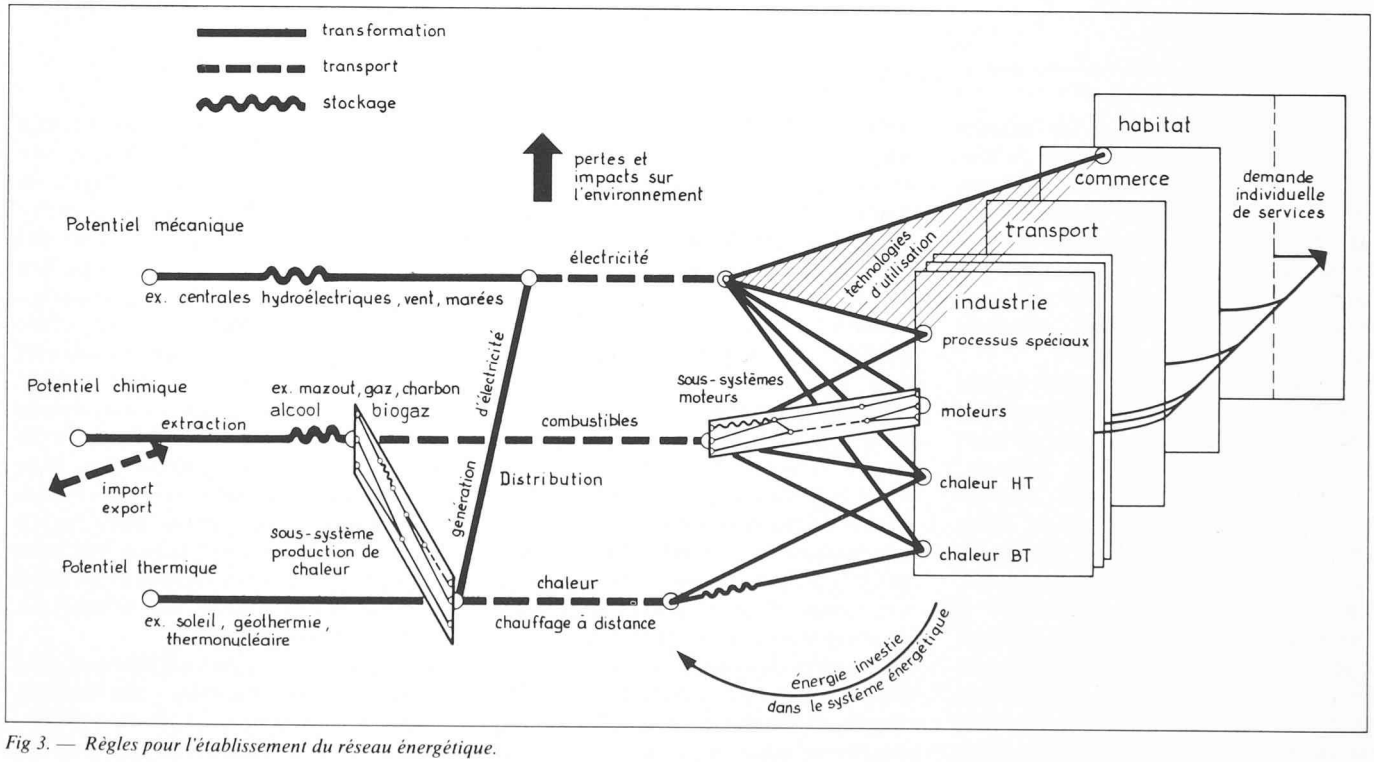

Fig 3. — Règles pour l'établissement du réseau énergétique.

ceux-ci peuvent se déduire de la combinaison des techniques de transformation associées à une stratégie énergétique.

— La demande d'énergie par les secteurs industriels et la consommation directe d'énergie correspondent aux besoins qu'il faudra satisfaire par des ressources et un réseau énergétique adéquat.

Les principales difficultés pour définir ces relations sont les suivantes :

Investissements requis : Pour chaque technique énergétique (transformation, transport, stockage), il est possible de déterminer l'investissement requis par unité de puissance. Pour une demande énergétique fixée et une combinaison de techniques retenue (stratégie énergétique), il sera possible de déterminer la totalité des investissements requis. Ceux-ci seront directement comparables aux possibilités économiques de former ces capitaux.

Echanges entre secteurs énergétiques : La subdivision des secteurs énergétiques, théoriquement simple, pose des problèmes importants au niveau opérationnel. Pour le modèle économique, la classification des secteurs représente un compromis entre l'analyse des techniques

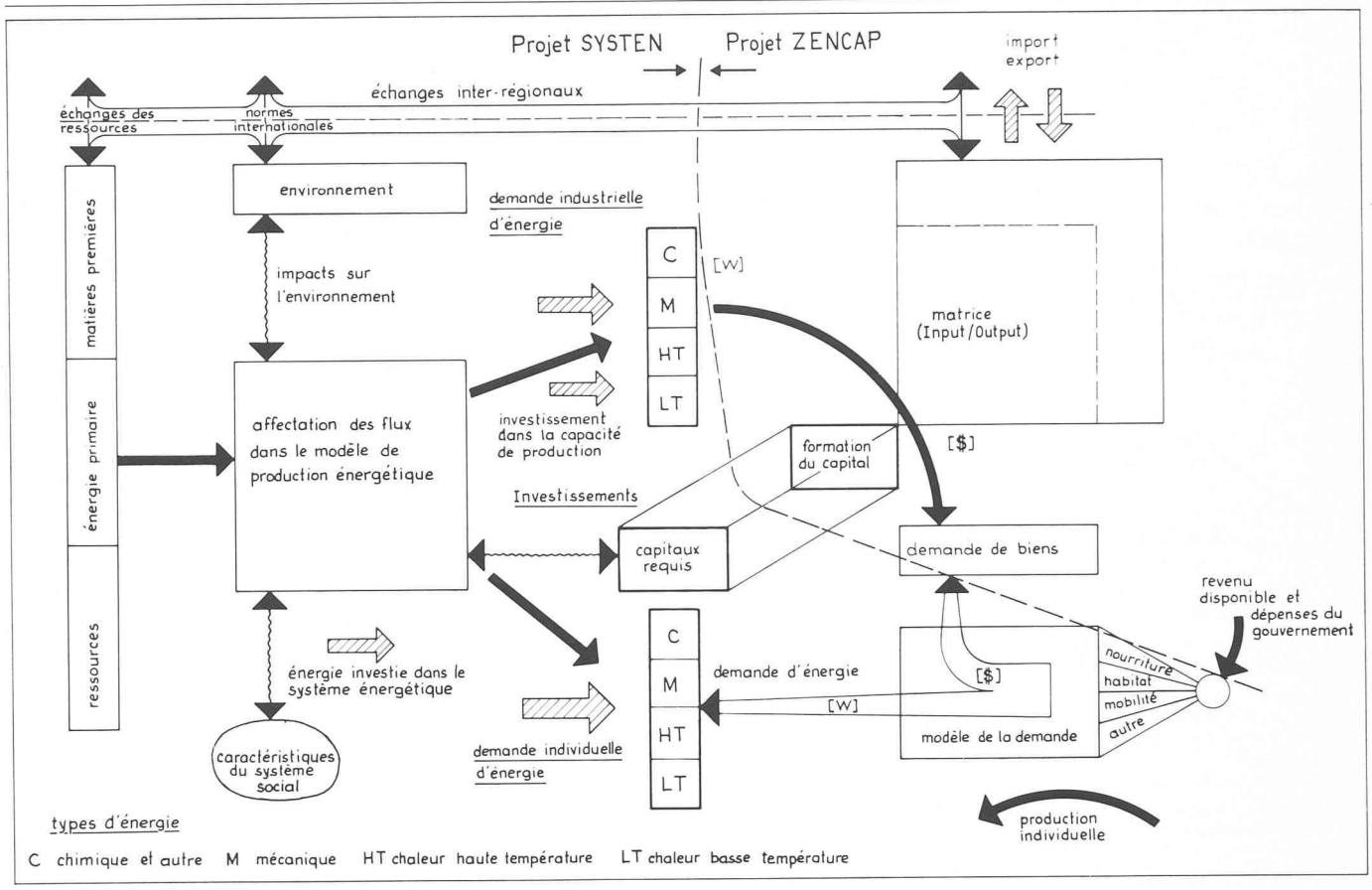

Fig. 4. — Modèle technique et son contexte économique.

de production d'énergie et les secteurs économiques traditionnels. Pour le modèle technique, cette matrice des échanges est simplement une représentation condensée du réseau énergétique (transformation, transport et stockage) permettant de satisfaire à une demande donnée à l'aide d'énergies primaires (fig. 3).

Demande d'énergie : Dans un modèle économique, la demande d'énergie est exprimée en termes d'*agents énergétiques* vendus aux consommateurs (mazout, électricité). Or, la demande d'agents énergétiques est très sensible au choix des techniques d'utilisation. Ainsi, la demande future d'électricité, par exemple, dépend directement du choix entre le chauffage à distance à base de charbon et le chauffage électrique, par exemple. Du point de vue technique, il est nettement préférable d'exprimer la demande par *nature d'énergie utile* (chaleur basse et haute températures, énergie mécanique ou processus spéciaux), de manière à pouvoir mettre en évidence les substitutions possibles au niveau de l'utilisation.

Une fois décrites les principales relations entre les deux modèles, il s'agit de voir comment travailler en parallèle. La figure 4 décrit un procédé possible. Partant d'un *revenu disponible* individuel, il s'agit de le distribuer entre les principaux services à satisfaire, tels que : alimentation, habitat, mobilité. Ces services peuvent être satisfaits par diverses combinaisons de biens et d'énergie et pour lesquels on peut calculer la demande totale d'*énergie directe* et de biens. Le modèle économique permet de déterminer l'énergie nécessaire pour produire ces biens, soit la *demande industrielle directe d'énergie*. Finalement on peut calculer la *demande industrielle indirecte d'énergie* sur la base des biens investis pour réaliser le système de production industriel et énergétique.

Cette approche intuitive en cours d'étude associe la demande totale d'énergie aux choix individuels sur la manière de satisfaire les services de base. Par ce moyen, il est possible de comparer divers « modes de vie », ou diverses manières de dépenser son revenu. Il est en particulier possible de prendre en considération le fait qu'une part des services de base peut être satisfaite directement, c'est-à-dire hors des circuits économiques. Cette *contribution non économique* au niveau de vie est particulièrement importante pour l'étude de systèmes énergétiques dans des pays en voie de développement.

3. Utilisation du modèle technique

Une fois le contexte économique défini, il est possible de procéder à l'analyse des combinaisons de techniques aptes à satisfaire une demande énergétique donnée [4]. Pour chaque cas traité, l'ensemble des techniques considérées sont organisées en un *réseau énergétique*, qui décrit toutes les options permettant de satisfaire une demande d'énergie (fig. 5). Il s'agira de contrôler la cohérence du réseau prévu et de déterminer les caractéristiques des moyens de transport et de stockage. Les caractéristiques par unité de puissance de chacun des équipements ont été organisées dans une banque de données CARTEN [4]. L'étape suivante consiste à déterminer les contributions de chaque technique pour satisfaire à la demande à l'aide des ressources à disposition. Pour ce faire, la programmation linéaire offre un algorithme pour générer une solution optimale ou une combinaison optimale des contributions des éléments du réseau (programme DESOM ou MARKAL [5, 6], par exemple).

Cet algorithme est particulièrement utile lorsqu'il s'agit d'optimiser des systèmes techniques (industrie, production d'électricité, radars par exemple) dont les limites, les contraintes et la direction centralisée sont bien définies. Il nous paraît moins bien adapté au traitement de ce système flou et complexe qu'est le système énergétique dans son contexte socio-économique.

Pour la génération de stratégies, ou combinaison des techniques mises à contribution, nous développons un *algorithme d'affectation proportionnelle*. Lorsque le choix est offert entre deux techniques, elles sont utilisées proportionnellement à leur attractivité. Cette attrac-

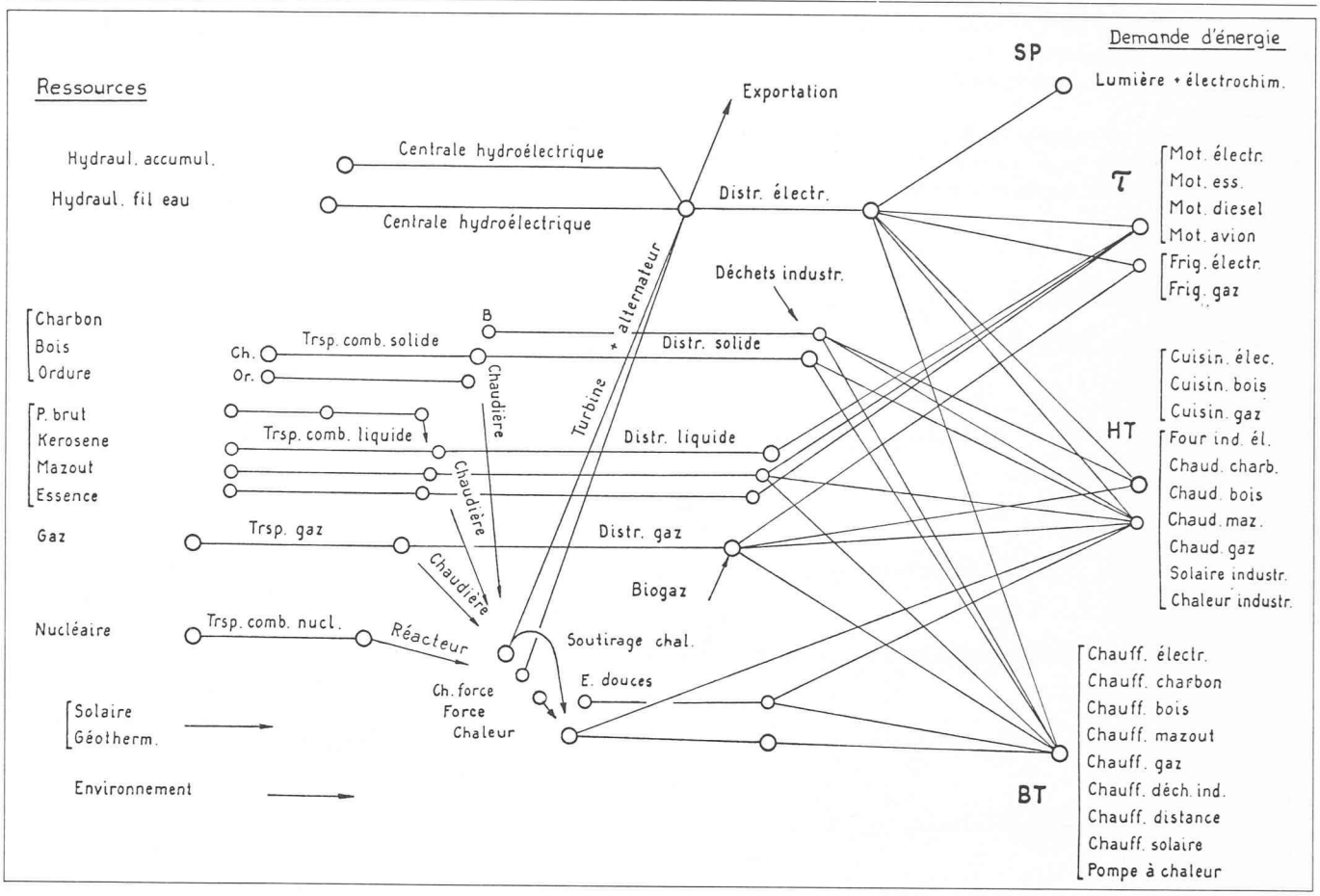

Fig. 5. — Constitution d'un réseau énergétique.

tivité peut être la performance proprement dite ; elle peut être aussi le coût, ou un coût social si celui-ci peut être fixé, ou encore une combinaison de caractéristiques liées aux émissions dans l'environnement. Cet algorithme, très facile à utiliser pour un réseau, a l'avantage sur la programmation linéaire d'introduire pour principales contraintes cette loi de proportionnalité, et non des flux maximaux ou des combinaisons de flux déterminées. Le choix proportionnel, par rapport au choix binaire de la programmation linéaire, permet de tenir compte de la multiplicité des centres de décision et des paramètres des choix ; il réduit de manière très nette l'influence de l'imprécision des données.

Cet algorithme dérive en fait de lois physiques classiques. Le flux d'électricité choisit les chemins de faible résistance, le flux de force dans une structure choisit les chemins de forte rigidité. Nous définissons ainsi un champ d'attractivité découlant des techniques ou arcs à disposition, chaque technique étant un arc du réseau énergétique.

Admettons l'existence d'un potentiel P en chaque nœud du réseau, le flux dans chaque arc sera défini par :

$$f_k = \varkappa_k \, \Delta P > 0$$

f_k flux de puissance sortant de l'arc k

$\varkappa_k$ attractivité

En écrivant l'équilibre des nœuds :

$$\Sigma f_{k1} = Q_1$$

f_{k1} flux dans les arcs ayant une extrémité au nœud 1

Q_1 débit entrant ou sortant au nœud 1

Nous obtenons un système linéaire dont la solution classique en éléments finis est, compte tenu de conditions aux limites adéquates :

$$P = K^{-1} \, Q$$

avec K = matrice d'attractivité combinant l'attractivité des arcs

Q = débits imposés et demande d'énergie en particulier.

La résolution de ce système conduit à minimiser l'expression suivante (fonctionnelle d'un champ physique) :

$$\Omega = \sum_{\text{réseau}} f_k \, \Delta P \text{ et définit la variation de potentiel } \Delta P = \frac{f_k}{\varkappa_k}$$

Si nous admettons pour attractivité le rendement ou l'inverse des pertes spécifiques, et pour le flux, le flux sortant des arcs, nous aurons :

$$\varkappa_k = \eta_k \qquad \Omega = \sum_{\text{réseau}} \frac{f_k^2}{\eta_k} = \sum_{\text{réseau}} f_k f_{ik}$$

$$\Delta P = \frac{f}{\eta} = f_i \quad ; \quad \varkappa_k = \left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)_k$$

$$\Omega = \sum_{\text{réseau}} f_k^2 \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)_k = \sum_{\text{réseau}} f_k \, p_k$$

$$\Delta P = \frac{f(1-\eta)}{\eta} = p$$

avec f_i = flux entrant

et p_k = pertes sur l'arc k

Lors du choix entre deux technologies, il est possible d'augmenter la *sévérité du choix* en utilisant non plus l'attractivité comme critère d'affectation, mais cette attractivité élevée à une puissance entière :

$$f_k = \varkappa_k^n \, \Delta P$$

n = degré de sévérité

Pour étendre cette procédure à l'ensemble du réseau, l'expression de la grandeur minimisée suggère le procédé suivant :

$$f_k^n = \varkappa_k f_k^{n-1} \, \Delta P$$

f_k^n = flux dans l'itération de sévérité n

nous aurons ainsi :

$$\varkappa_k = \eta_k$$

$$\Omega^n = \sum_{\text{réseau}} \frac{f_k^{2n}}{\eta_k \, f_k^{n-1}} \Longrightarrow \Omega^{n=\infty} = \Sigma f_{ik}$$

solution qui minimise les flux entrants ou l'énergie primaire

$$\varkappa_k = \left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)_k$$

$$\Omega^n = \sum_{\text{réseau}} \frac{f_k^{2n} \, (1-\eta)_k}{f_k^{n-1} \, \eta_k} \Longrightarrow \Omega^{n=\infty} = \Sigma p_k$$

solution qui minimise les pertes.

Ainsi, en augmentant le degré de sévérité, les contraintes initiales de proportionnalité disparaissent et la solution tend vers l'optimum de la programmation

linéaire. Toutefois, si deux chemins ont des attractivités identiques, ce n'est pas un seul qui sera choisi, mais les deux par moitié.

La figure 6 donne un exemple de répartition proportionnelle aux rendements énergétiques pour deux degrés de sévérité différents. Dans cet exemple, lorsqu'on tend vers « l'optimum », la part de chauffage à distance et de moteurs électriques devient incohérente et cette combinaison ne peut être prise en considération sans introduire des contraintes de flux minimaux sur le chauffage individuel et les moteurs à explosion. Fixées à long terme, ces contraintes ne pourraient être qu'arbitraires.

Si l'on choisit pour attractivité les coûts, ou une autre caractéristique telle qu'une combinaison d'émissions, la formulation est moins aisée, le flux d'énergie étant

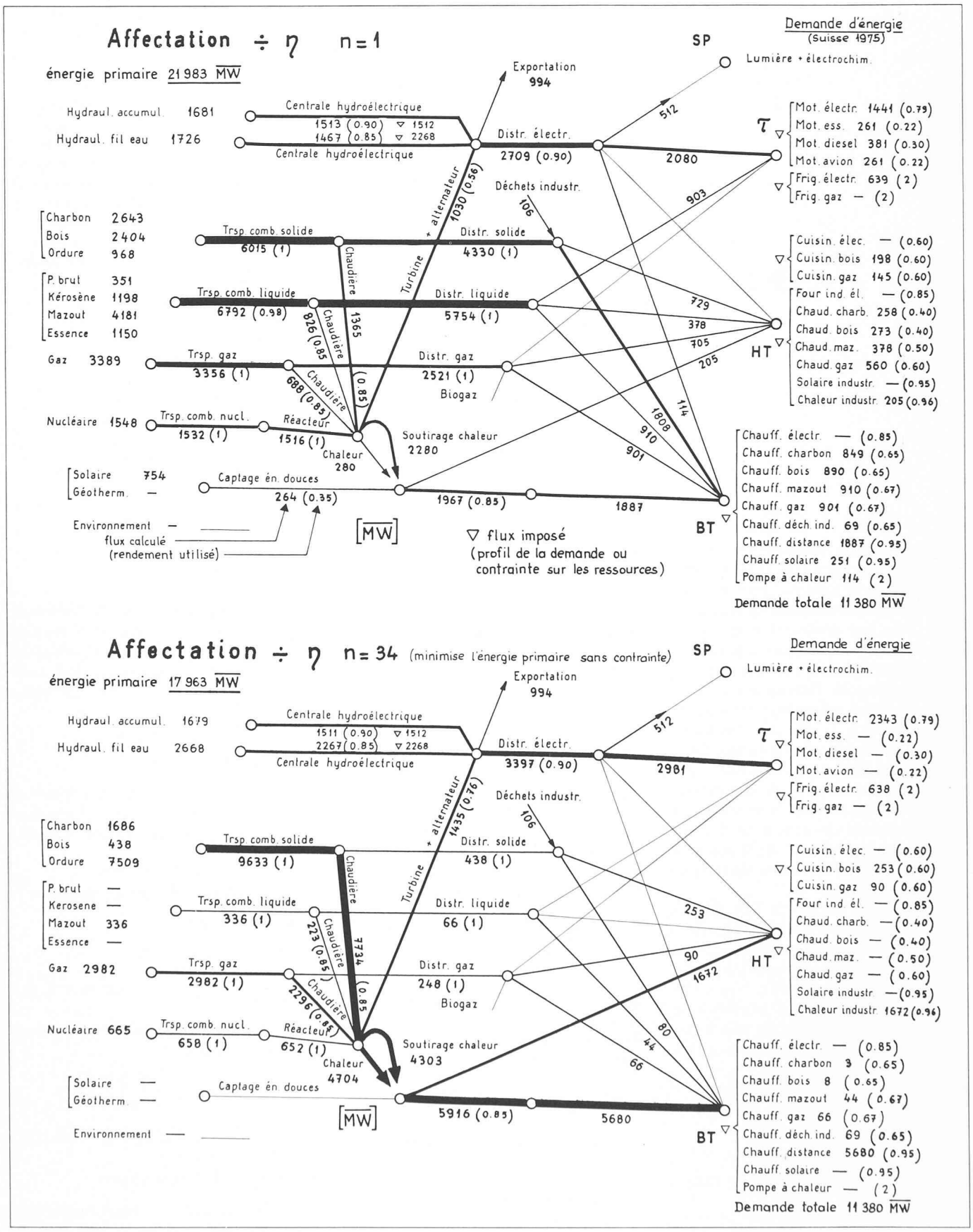

Fig. 6. — Exemples de combinaisons de technologies pour satisfaire à une demande donnée.

dissipatif à la suite des pertes dans chaque arc. La formulation suivante donne l'affectation proportionnelle aux coûts annuels et pour un degré de sévérité croissant :

$$\varkappa_k = \frac{1}{CM^{n-1}\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)_k + C_k}$$

$$\Omega^n = \sum_{\text{réseau}} \frac{f_k^{2n}\left(CM\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)_k + C_k\right)}{f_k^{n-1}}$$

$$f_k^n = \varkappa_k f_k^{n-1}\,\Delta P$$

$$\Omega^{n=\infty} = \sum_{\text{réseau}} f_k\,C_k + p_k\,CM_1$$

avec $f_k^0 = 1$ $CM^0 = 0$

CM_1 = coût moyen (somme pondérée des contributions des arcs amonts), peut être égal au potentiel P sous certaines réserves.

C_k = coût spécifique ajouté par l'arc k.

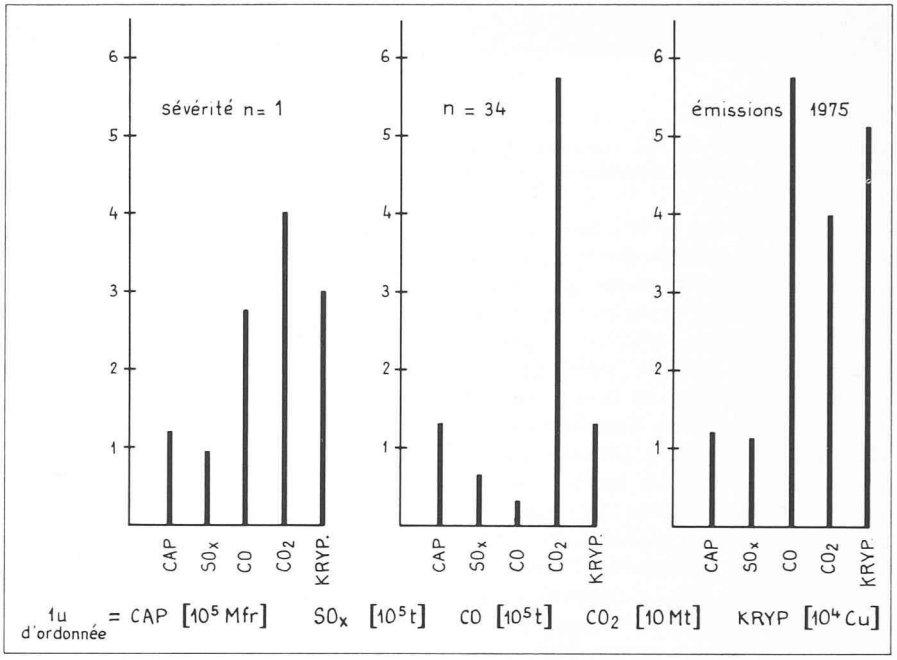

Fig. 7. — Profils types de stratégies énergétiques (demande énergétique suisse 1975).

4. Choix de stratégies significatives

L'algorithme proposé permet de générer une succession de variantes pour lesquelles de nombreux indicateurs peuvent être calculés, tels que :

— Investissement total.
— Emissions de polluants dans l'environnement (fig. 7).

A l'aide des coefficients d'échange entre les secteurs industriels, il est possible de calculer des indicateurs économiques [7] :

— Contenu énergétique des investissements.
— Main-d'œuvre requise pour la production de ces investissements.

Enfin, dans la mesure où des critères objectifs peuvent être identifiés, il est possible de calculer d'autres indicateurs et, par exemple :

— Part de l'infrastructure susceptible d'être réutilisée en cas d'introduction d'une nouvelle ressource.
— Probabilités de panne ou de dommages associées à la combinaison de techniques.
— Proportion des ressources énergétiques dans le commerce extérieur avec les pays fournisseurs.
— Niveau de centralisation ou adéquation aux habitudes locales.

Ces indicateurs peuvent décrire une stratégie ; ils permettent aussi, en intervenant ponctuellement sur les attractivités initiales, de générer de nouvelles stratégies dotées de caractéristiques particulières plus intéressantes.

Il sera alors possible de sélectionner un nombre plus restreint de stratégies significatives de manière subjective, ou à l'aide de procédés de réduction multicritères [8].

Les stratégies retenues seront donc des combinaisons possibles d'équipements mettant en relation les choix techniques et leurs répercussions décrites de manière aussi transparente que possible.

5. Rétroaction de l'économie

La description de stratégies énergétiques et de leurs caractéristiques économiques est déjà un résultat susceptible de servir de base à un organisme chargé de soutenir ou de freiner des orientations possibles du système énergétique.

Dans le cadre du projet commun ZENCAP-SYSTEN, un procédé de rétroaction est en cours d'étude. Les coefficients d'échange entre secteurs industriel et économique sont modifiés, conformément à une stratégie énergétique sélectionnée, et la simulation macroéconomique se poursuit de manière à mettre en évidence les impacts sur les investissements et le revenu disponible d'une stratégie énergétique particulière.

Conclusion

Deux tendances extrêmes sont sous-jacentes en matière d'énergie. L'une montre, sur la base de l'évolution économique, le caractère inéluctable de l'adaptation du système énergétique. L'autre, hors des lois économiques, propose des systèmes énergétiques performants du point de vue écologique et social. L'approche présentée vise à une meilleure analyse des interactions entre les choix techniques et économiques, analyse apte à considérer des caractéristiques plus globales et plus proches des préoccupations des individus. La justification de cette approche se base sur l'idée de plus en plus répandue que les progrès effectués à l'intérieur des secteurs spécialisés sont limités, alors qu'une analyse des frontières entre secteurs spécialisés offre des possibilités d'évolution beaucoup plus vastes.

Références bibliographiques

[1] B. Fritsch, R. Codoni, B. Saugy : *The Use of Input-Output Technics in an Energy-oriented Model.* Proceedings of 5th Global Modeling Conference of IIASA, Sept. 1977, Laxenburg (A).

[2] *Ressources énergétiques mondiales 1985-2020*, publiées pour la Conférence mondiale de l'énergie par les Editions Technip, Paris 1978.

[3] P. Staub and al. : *Structural Change in Energy Production and its Impact on Capital Requirements : An Empirical Model, Proceeding of the Workshop on Energy Strategies.* Conception and Embedding, Wolf Häfele, Editor. IIASA, mai 1977, Laxenburg (A).

[4] B. Saugy, Y. Bovet, A. Roulier : *Modélisation du système énergétique suisse.* Proceedings of the international Symposium « Simulation 77 », Montreux, juin 1977. Actapress Zurich.

[5] F. Altdorfer, M. Finnis, S. Rath-Nagel : *An International Programm for Evaluating Energy.* Technologies and Strategies. Athènes 1978.

[6] J.-M. Toinet : *Les travaux du Groupe « Analyse des Systèmes » de l'IEA.* Séminaire on Energy Modeling, Lausanne 1978.

[7] J.-M. Toinet : *Energie grise.* Proceeding of 6th Global Modeling Conference of IIASA, octobre 1978, Laxenburg (A).

[8] *Le Projet d'Ecole « Energie » de l'EPFL.* EPFL, 1977.

Adresse de l'auteur :
Bernard Saugy, ing. EPFL-SIA
adjoint scientifique à l'IPEN
avenue Dapples 17
1006 Lausanne